Clean Technol., Vol. 27, No. 3, September 2021, pp. 255-260

청정환경기술

이소프로판올을 포함한 디에틸렌트리아민 상분리 흡수제의 CO_2 흡수 특성

이화영, 석창환, 홍연기*

한국교통대학교 응용화학에너지공학부 화공생물공학전공
27469 충북 충주시 대소원면 대학로 50

(2021년 7월 12일 접수; 2021년 8월 5일 수정본 접수; 2021년 8월 6일 채택)

Effect of Isopropanol on CO_2 Absorption by Diethylenetriamine Aqueous Solutions

Hwa Young Lee, Chang Hwan Seok, and Yeon Ki Hong*

School of Chemical and Materials Engineering, Korea National University of Transportation
50, Daehak-ro, Daesowon-myeon, Chungju, Chungbuk, 27469, Korea

(Received for review July 12, 2021; Revision received August 5, 2021; Accepted August 6, 2021)

요 약

아민 수용액을 이용한 CO_2 포집 공정의 문제점은 재생에 따른 높은 에너지 요구량이다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 디에틸렌트리아민(diethylenetriamine, DETA) 수용액에 이소프로판올(isopropanol, IPA)을 도입한 상분리 흡수제 적용에 따른 CO_2 포집 특성을 고찰하였다. 20 wt% DETA 수용액에서 IPA 조성이 20 wt%를 이상이 되면 CO_2를 흡수함에 따라 흡수제의 상이 CO_2-농축상과 CO_2-희박상으로 액-액 분리된다. 그 이유는 CO_2와 DETA가 반응하여 형성된 염의 IPA에 대한 낮은 용해도 때문이다. DETA 수용액에서 IPA 조성이 증가하면 CO_2-희박상의 부피에 대한 CO_2-농축 상의 부피비가 증가하게 되고 이에 따라 CO_2-희박상에서의 CO_2 농축 정도가 높아지게 된다. 20 wt% DETA + IPA + 물 흡수제를 이용하여 흡수탑에서 CO_2를 흡수한 결과 20 wt% DETA 수용액 흡수제에 비해 CO_2 흡수능 및 흡수속도가 모두 높은 것으로 확인되었다. DETA + IPA + 물로 구성된 상분리 흡수제를 CO_2 포집에 적용할 경우 상분리 따른 CO_2 농축과 CO_2-농축상의 부피 감소에 따른 재생에너지 저감을 기대할 수 있다.

주제어 : 이산화탄소 포집, 상분리 흡수제, 이소프로판올, 재생에너지

Abstract : A drawback in the CO_2 capture process using an aqueous amine solution is the high energy requirement for the regeneration process. In order to overcome this disadvantage, this study investigated CO_2 capture characteristics using a biphasic absorbent in which isopropanol (IPA) was introduced into an aqueous solution of diethylenetriamine (DETA). When the IPA composition exceeded 20 wt% in 20 wt% DETA aqueous solution, the absorbent phase was liquid-liquid separated into a CO_2-rich phase and a CO_2-lean phase because of the low solubility of the salt formed by the reaction of CO_2 with DETA in isopropanol. When the isopropanol composition in the DETA aqueous solution increased, the phase volume ratio of the CO_2-rich phase to the volume of the CO_2-lean phase increased; and, accordingly, the CO_2 in the CO_2-rich phase was more concentrated. The results of absorbing CO_2 in a packed tower using 20 wt% DETA + IPA + water absorbent confirmed that both the CO_2 absorption capacity and the absorption rate were higher than that of the 20 wt% DETA aqueous solution. When a biphasic absorbent composed of DETA + IPA + water is applied to CO_2 capture, it can be expected to concentrate CO_2 because of phase separation and thereby reduce regeneration energy owing to volume reduction of the CO_2-rich phase.

Keywords : CO_2 capture, Biphasic absorbent, Isopropanol, Regeneration energy

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hongyk@ut.ac.kr; Tel: +82-43-841-5231; Fax: +82-43-841-5220

doi: 10.7464/ksct.2021.27.3.255 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licences/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

이산화탄소(CO_2) 포집은 화석 연료의 연소에 따른 CO_2 배출을 제어할 수 있는 중요한 기술로 평가 받고 있다. 그 중에서도 연소 후 포집기술은 기존 설비 변경 없이 포집설비를 추가할 수 있기 때문에 CO_2 배출 저감을 위한 효과적인 수단일 될 수 있다. 그러나 석탄 화력 발전소의 경우 연소 후 배가스에서 CO_2의 조성이 10-15 vol%, 천연가스 화력 발전소의 경우 4-7 vol%에 불과하고 배가스의 압력 역시 대기압 근처이다. 이는 CO_2 포집을 위한 낮은 구동력을 제공할 뿐 아니라 처리해야 하는 배가스의 양을 증가시킴으로써 포집에 필요한 에너지 요구량 및 비용 상승의 원인이 된다[1].

아민 흡수제를 이용한 화학 흡수법이 연소 후 포집기술로 널리 활용되어 왔다. 일반적으로 모노에탄올아민(monoethanolamine, MEA)을 사용한 흡수 공정이 산업적인 규모의 연소 후 포집기술에 대한 기준이 되어 왔다. 그러나 MEA 기반 공정 역시 흡수재 재생 및 CO_2 탈거에 따른 에너지 요구량이 높음에 따라 기존 화력발전소에서의 발전 효율 저하를 일으키게 된다[2].

모노에탄올아민을 이용한 흡수공정 조업에 따른 전체 에너지 소비량의 60%가 용매 재생 및 CO_2 탈거에 소비된다. 이러한 재생 에너지는 반응열, 현열, 그리고 잠열을 포함하고 있다. 따라서 보다 낮은 반응열, 높은 끓는점 그리고 더 낮은 열용량을 갖는 CO_2 흡수제에 대한 연구가 진행되었었다. 이에 대한 대표적인 흡수제로는 메틸디에탄올아민(methyldiethanolamine, MDEA), 2-아미노-2-메틸-프로필알콜(2-amino-2-methyl-propyl alcohol, AMP), 암모니아 등이 있다[3, 4]. 이들 흡수제는 MEA에 비해 상대적인 낮은 반응열에 따른 재생열의 일부를 저감했으나 저감 양이 크지 않고 흡수 속도가 낮아지는 것으로 보고되었다. 습식 CO_2 포집공정에서의 재생열을 보다 근본적으로 저감하기 위한 방법 중의 하나로서 흡수단계에서 흡수된 CO_2를 농축시킴으로써 재생공정으로 유입되는 흡수제의 양을 줄이는 방법에 대한 연구가 주목받고 있으며 이 중 하나가 상분리(phase splitting) 흡수제이다.

상분리 흡수제는 CO_2 로딩 또는 조업 온도에 따라 단일 상으로 존재하는 흡수제가 높은 CO_2 로딩 값을 갖는 액체상(CO_2-농축상)과 낮은 CO_2 로딩 값을 갖는 액체상(CO_2-희박상)으로 분리되는 흡수제를 말한다. 전자를 CO_2-triggered 상분리 흡수제라고 하고 후자를 열형태학적(thermomorphic) 상분리 흡수제라고 한다. 상평형 원리에 따르면 CO_2-농축 층에서의 높은 CO_2 로딩은 탈거탑에서 수증기 분압에 대한 더 높은 CO_2 분압을 의미하므로 탈거열 제공을 위한 수증기 형성에 따른 재생열을 감소시킬 수 있다. 또한 더 높은 CO_2 분압은 포집 이후의 CO_2 압축에 따른 에너지도 줄일 수 있게 한다. 결론적으로 상분리 흡수제를 사용할 경우 흡수제 재생공정에서 공정열과 관련된 모든 에너지를 줄 일 수 있게 된다. 추가적으로는 탈거탑으로 유입되는 흡수제의 양이 줄어들게 되어 관련된 장치의 설비비용도 줄일 수 있다[5].

상분리 흡수제는 주 흡수제, 상분리 촉진제, 그리고 물로 구성되며 주 흡수제와 상분리 촉진제는 아민-아민 간의 조합 또는 아민-물리 흡수제의 조합이 될 수 있다. 아민-아민 조합에서 상분리 촉진제로는 2-디에틸아미노 에탄올(2-diethylamino-ethanol, DEEA)가 대표적이며 DEEA와 조합될 수 있는 주 흡수제로는 디에틸렌트리아민(diethylenetriamine, DETA)[6], N-메틸-1,3-프로판-디아민(N-methyl-1,3-propane-diamine, MAPA)[7], 아미노에틸에탄올아민(aminoethylethanolamine, AEEA)[8], 1,4-부탄디아민(1,4-butanediamine, BDA)[9] 등이 있다. 이들은 상분리 거동이 분명할 뿐 아니라 CO_2 흡수능 측면에서도 30% MEA에 비해 50%가량 더 높은 흡수능을 보여주는 것으로 알려져 있다. 아민-물리 흡수제 조합 상분리 흡수제에 사용되는 물리 흡수제로는 설폴레인(sulfolane)이나 긴 사슬 알콜, 에테르 등이 대표적이며 이들과 조합한 상분리 흡수제로는 MEA/설폴레인[10], MEA/옥탄올[11], 2-에틸아미노에탄올(2-ethylaminoethanol, EMEA)/디에틸렌글리콜디에틸에테르(diethylene glycol diethyl ether, DEGDEE)[12] 등이 있다. MEA가 갖는 포집 성능의 한계를 극복하기 위해 입체 장애 아민인 AMP를 첨가한 AMP/MEA 기반 상분리 흡수제를 CO_2 포집에 적용한 사례도 있다. AMP/MEA 기반 상분리 흡수제의 경우 30% MEA에 비해 CO_2 포집 성능에서는 69%가 향상된 반면 36%의 재생 에너지가 감소된 것으로 보고되었다[13].

본 연구에서는 CO_2 흡수 성능을 높이기 위해 3개의 아민 작용기를 갖는 폴리 아민인 DETA를 주 흡수제로 하여 IPA를 상분리 촉진제로 첨가한 흡수제를 사용하였다. MEA와 비교했을 때 DETA는 CO_2에 대한 높은 반응성과 물질전달 거동, 그리고 높은 CO_2 로딩에도 불구하고 반응열과 재생 에너지가 더 낮다는 장점을 갖고 있다[14]. 아민/아민 상분리 흡수제를 사용했을 경우 상분리 촉진을 위해 사용되는 아민이 CO_2와의 반응함에 따라 점도가 더 증가될 뿐 아니라 아민에 의한 부식 문제를 발생시킬 수 있다. IPA는 아민 상분리 촉진제에 비해 가격이 저렴하고 상분리 촉진제로서의 역할 뿐 아니라 다른 유기 용매에 비해 점도가 낮아 흡수제 상에서의 효과적인 물질전달을 가능하게 하고 물에 비해 CO_2에 대한 용해도가 높다는 장점을 갖고 있다. 또한 흡수된 CO_2의 재생 과정에서 IPA가 흡수제 재생 공정에 사용되는 스윕 기체(sweeping gas)와 같이 재생 단계에서 기체상의 CO_2 분율을 낮추어 주기 때문에 재생과정에서 CO_2-농축상인 액체에서 기체로의 물질전달을 촉진하게 된다. 본 연구에서는 IPA의 조성에 따른 각 상에서의 CO_2 로딩값과 부피, 그리고 점도를 측정하여 CO_2 흡수에 따른 흡수제의 상분리 거동을 고찰하였다. 또한 흡수탑에서 DETA/IPA/물 상분리 흡수제의 조업 가능성을 확인하였다.

2. 실험방법

2.1. 상분리 흡수제의 제조

본 연구에서는 주 흡수제로 DETA (Sigma-Aldrich, 99.0%), 상분리 촉진제로 IPA (Sigma-Aldrich, 99.9%)를 사용하였고 이를 증류수에 용해하여 상분리 흡수제를 제조하였다. 상분리 흡수제에서 DETA의 농도는 20 wt%이며 DETA/IPA 수용액에서 IPA의 무게 분율은 20 - 50 wt%로 조절하였다.

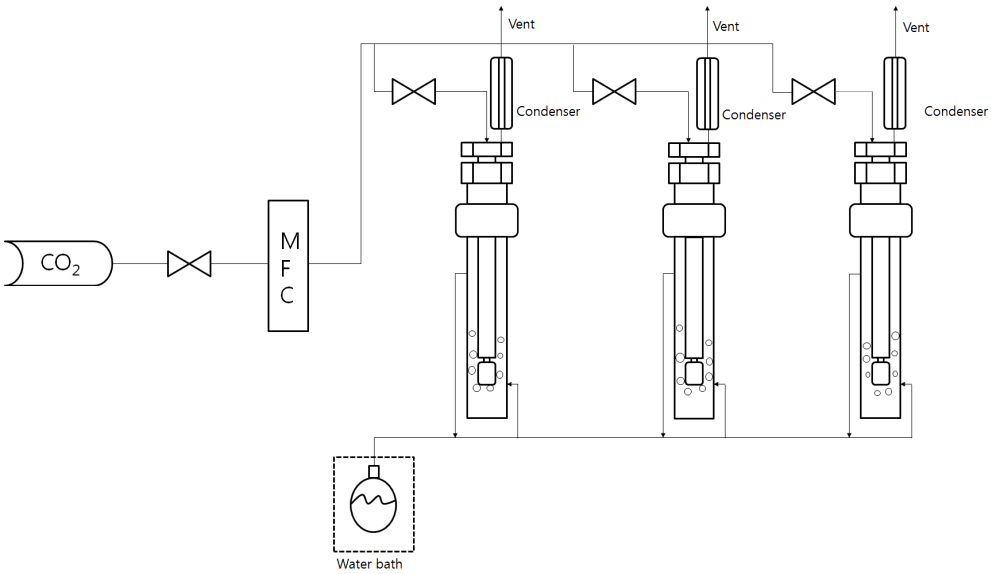

Figure 1. Turbidity measurement apparatus for CO_2 absorption by biphasic solvents.

2.2. 실험 과정

CO_2 흡수에 따른 흡수제의 상분리를 명확하게 관찰하기 위해 Figure 1과 같은 탁도 적정법에 기초한 흡수제 스크리닝 장치를 제작하여 사용하였다. 우선 100 mL의 상분리 흡수제를 장치에 설치된 기포탑(bubble column)에 주입한다. N_2 (Daesung Gas Co., 99.999%)에 CO_2 (Daesung Gas Co., 99.99%)를 15 vol%로 혼합한 혼합 기체를 대기압 하에서 유속 100 mL min^{-1}로 기포탑 하부를 통해 주입한다. 혼합기체의 유속은 질량 흐름 조절기(mass flow controller, MFC)를 통해 제어한다. 기포탑 하부로 혼합기체를 낮은 유속으로 주입하는 이유는 실험과정에서 기체 버블에 의해 흡수제에서 형성된 상 계면이 깨지는 것을 방지함으로서 계면 형성을 보다 정확하게 측정하기 위한 것이다. 기포탑 주위로는 물 재킷(water-conducting jacket)을 설치하였고 이를 통해 기포탑의 조업 온도를 40 ℃로 일정하게 유지하였다. CO_2 포집에 따라 상분리가 이루어지면 각 상으로부터 흡수제 샘플을 취하여 분석하였다.

흡수제에서의 CO_2 농도는 총 탄소 분석기(Multi N/C 3100, Analytik Jena, Germany)를 사용하여 측정하였고 물의 농도는 수분분석기(870KF Titrino plus, Metrohm, Switzerland)를 사용하여 칼-피셔(Karl-Fischer) 적정법으로 측정하였다. 흡수 실험이 종료된 이후 각 상의 부피는 눈금이 있는 주사기를 이용하여 측정하였다. 흡수제의 점도는 점도측정기(DV2T, Brookfield, USA)를 이용하여 측정하였다.

소형 충진탑 장치 및 이를 이용한 CO_2 흡수 조업은 이전에 보고한 장치와 방법을 따랐다[15].

3. 결과 및 고찰

DETA, IPA, 그리고 물로 구성된 흡수제의 흡수 성능은 DETA를 20 wt%를 유지하면서 물과 IPA의 혼합비를 조절하면서 측정하였다. CO_2가 흡수되기 전 모든 조성에서 흡수제는 균일한 상을 유지하였다. CO_2가 흡수됨에 따라 흡수제에서 IPA의 무게 분율이 20 wt%를 넘기 시작하면 액체상에 탁도가 다른 두 상이 형성되면서 상분리가 발생하게 된다. 상분리 이후 상부상에는 CO_2-농축상, IPA-농축상이 형성되고 하부상에는 CO_2-희박상, IPA-희박상이 형성된다.

본 연구에서 IPA의 무게 분율을 20 - 50 wt%로 정한 이유는 IPA의 농도가 50 wt%를 넘게 되면 고체상 침전물이 형성되기 때문이다. 즉, 흡수제에서 물은 $DETAH^+$나 $DETACOO^-$이온을 이들 이온과 물의 분자 간 수소결합을 통해 용해시키는 역할을 수행하는데 만일 물의 조성이 낮은 경우 이들 이온 종간의 강한 인력으로 인해 고체 침전물이 발생된다. 또한 20 wt% 미만으로 IPA가 포함될 경우 흡수제에서 액-액 상분리가 발생하지 않아 흡수된 CO_2를 농축할 수 없게 된다.

Figure 2에서 보듯이 흡수제에서 20 wt% 이상의 IPA 무게 분율에서 흡수제의 액-액 상분리가 발생하였다. 상분리 흡수제

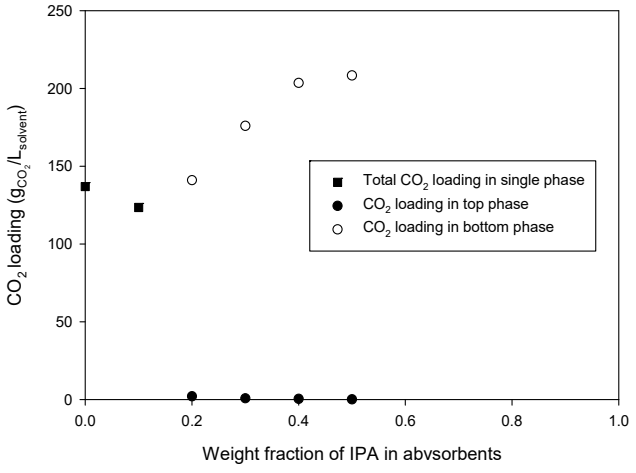

Figure 2. Effect of IPA composition in 20 wt% DETA + IPA + water absorbents on CO_2 loading in each phase at 40 ℃.

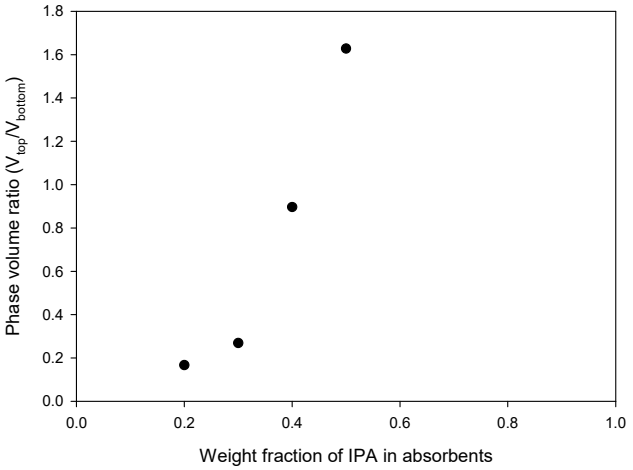

Figure 3. Phase volume ratio with IPA composition in 20 wt% DETA + IPA + water absorbents at 40 ℃.

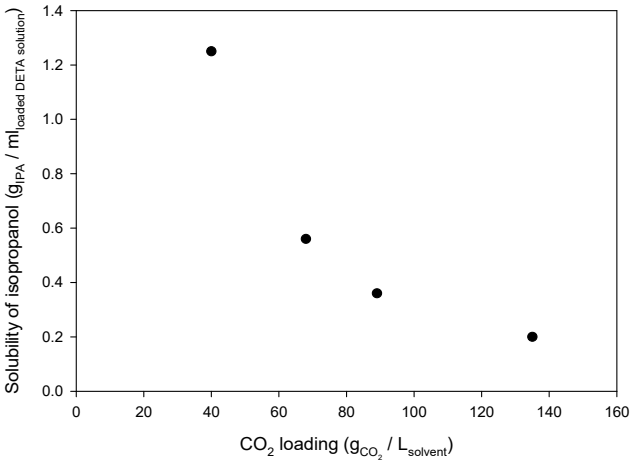

Figure 4. Solubility of IPA in CO_2-loaded DETA aqueous solutions at 40 ℃.

에서 대부분의 포집된 CO_2는 하부상으로 집중되어 있어 상분리에 따른 CO_2 농축효과가 높은 것으로 나타났다. DETA는 2개의 1차 아민기와 1개의 2차 아민기를 갖고 있으므로 CO_2와의 반응을 통해 탄산염과 중탄산염 모두를 형성할 수 있다. 흡수제에서 IPA의 농도가 높아질수록 IPA에 대한 DETA 탄산염의 용해도는 감소하게 되므로 DETA 탄산염은 하부상으로 용해된다. 하부상에서의 CO_2 로딩은 IPA가 40 wt%로 혼합된 경우 202 g CO_2 L^{-1} solvent이었는데 이 값은 30 wt% MEA 수용액 흡수제의 CO_2 로딩인 약 100 g CO_2 L^{-1} solvent의 2배에 달한다.

IPA 농도에 따른 하부상 부피에 대한 상부상 부피의 비율(phase volume ratio, PVR)의 변화를 Figure 3에 나타내었다. IPA가 20 wt%포함되었을 때 PVR값이 0.17이었으나 IPA의 무게 분율이 50 wt%에 이르면 PVR값이 1.62로 급격히 증가하였다. 이는 DETA가 CO_2 흡수함에 따라 형성되는 아민염은 IPA에 대한 용해도가 제한적이므로 하부상으로 이동하게 되고 IPA는 상부상으로 이동하게 된다. 상분리 흡수제에서 IPA의 조성이 높아질수록 같은 원리에 따라 상분리에 의해 하부상에서는 흡수된 CO_2가 더 농축이 되고 상부상으로는 IPA만 이동하게 된다. 20 wt% DETA + 20 wt% IPA + 60 wt% 물에서 상분리 후 하부상에서 CO_2 로딩 값이 137 g CO_2 L^{-1} solvent인데 20 wt% DETA+50 wt% IPA+30 wt% 물 흡수제에서는 하부상에서의 CO_2 로딩 값이 208 g CO_2 L^{-1} solvent까지 상승하게 되는 것 역시 같은 이유로 설명할 수 있다.

CO_2가 흡수됨에 따라 IPA이 상부상으로 이동함을 검증하기 위해 CO_2를 흡수한 DETA 수용액에 대한 IPA의 용해도를 측정하였다. IPA 용해도 측정은 다음과 같이 이루어졌다. 20 wt% DETA 수용액에 CO_2를 흡수시킨 다음 CO_2가 흡수되지 않은 같은 농도의 DETA 수용액으로 희석하여 다양한 CO_2 농도를 갖는 DETA 수용액을 만들었다. 여기에 IPA를 첨가하여 액-액 상분리가 발생할 때까지의 IPA 투입량을 측정하였다. Figure 4에서 보듯이 DETA 수용액에서 CO_2 로딩이 증가함에 따라 IPA의 용해도는 감소하였다. 이와 같은 CO_2 로딩에 따른 용해도 변화를 통해 Figure 3에서 설명한 IPA 이동에 따른

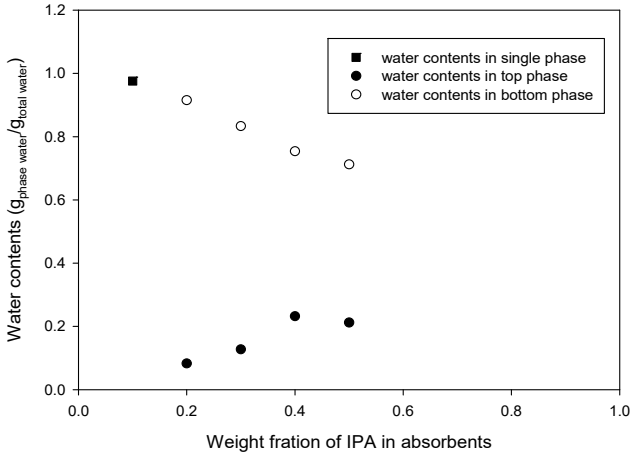

Figure 5. Effect of IPA composition in 20 wt% DETA + IPA + water absorbents on water composition in each phase at 40 ℃.

PVR의 변화에 대한 가설이 성립함을 알 수 있었다.

또한 DETA + IPA + 물 흡수제에서 상분리에 따른 CO_2-농축상에서의 CO_2 로딩값이 DETA 수용액 흡수제의 CO_2 로딩 값보다 높으므로 흡수제 재생에 따른 순환(cyclic) 로딩 값 역시 기존의 DETA 수용액에서의 값보다 더 커지게 된다. 결국 흡수제의 상분리에 따라 CO_2가 농축된 CO_2-농축상의 부피 감소 및 CO_2 로딩의 증가는 CO_2 흡수공정 조업에 따른 에너지 소비 저감에 크게 기여할 것으로 판단된다.

Figure 5에서는 DETA + IPA + 물 흡수제에서 IPA 조성에 따른 상분리 이후 상부상과 하부상에서의 물의 조성 변화를 보여주고 있다. CO_2 흡수과정에 의해 형성된 DETA염 분자당 상호작용하는 물 분자의 양이 동일하다고 가정할 경우 DETA에 의해 흡수된 CO_2의 농도가 높아질수록 IPA과 상호작용할 수 있는 물의 양이 줄어들게 되므로 IPA는 상부상으로 이동하고 그에 따라 상부상에서의 물의 농도는 줄어들면서 농축 효과는 커지게 된다.

흡수된 CO_2의 농축효과가 증가함에 따라 흡수제 재생단계에서의 재생열 감축효과가 증가하지만 CO_2 농축에 따른 CO_2-

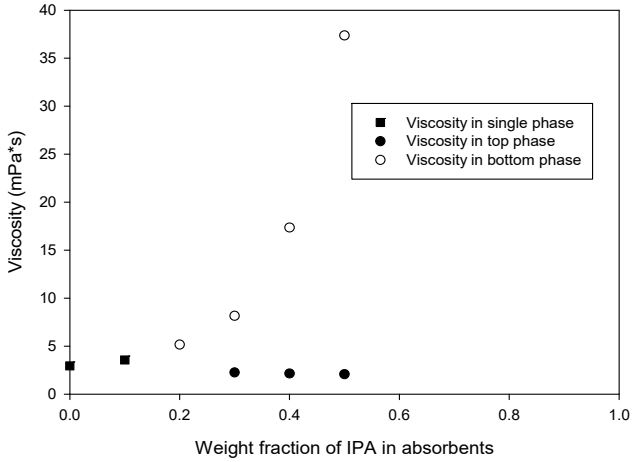

Figure 6. Viscosity of each phase with IPA composition in 20 wt% DETA + IPA + water absorbents at 40 ℃.

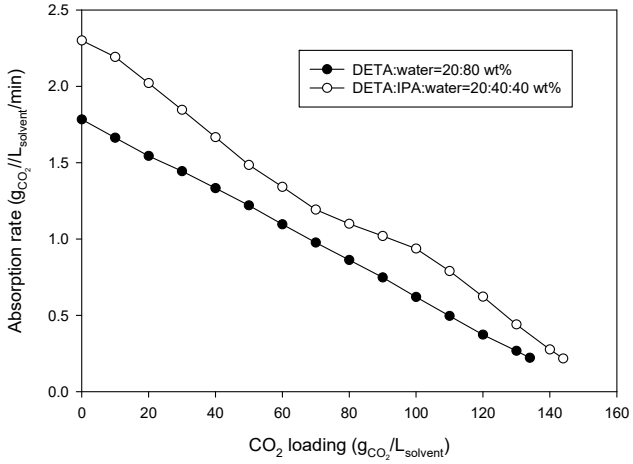

Figure 7. Absorption rate with CO_2 loading in packed column operation at 40 ℃.

농축상의 점도가 증가하게 되므로 실제 흡수탑 또는 탈거탑에서의 조업에 어려움이 따를 수 있다. 일반적으로 흡수탑 또는 탈거탑에서 조업 가능한 점도는 약 20 cP 이하가 되어야 하는 것으로 알려져 있다. Figure 6에서는 DETA + IPA + 물 흡수제에서 IPA 조성에 따른 CO_2-농축상과 CO_2-희박상의 점도 변화를 보여주고 있다. 점도가 크게 변하는 하부상의 경우 조성에 따라 5-38 cP의 점도 변화를 보여주고 있다. 적정 조업 범위 내에서 CO_2-농축상에서의 CO_2 로딩값을 최대로 얻을 수 있는 흡수제의 조성은 20 wt% DETA + 40 wt% IPA + 20 wt% 물임을 알 수 있다.

위의 결과를 바탕으로 흡수탑 조업을 통해 20 wt% DETA 수용액 흡수제와 20 wt% DETA + 40 wt% IPA + 20 wt% 물 상분리 흡수제의 흡수 성능을 비교하였다. Figure 7에서는 시간에 따른 흡수속도의 변화를 보여주고 있다. DETA + IPA + 물로 구성된 상분리 흡수제의 흡수속도가 로딩 값 전체에 걸쳐 DETA 수용액 흡수제에 비해 더 높을 뿐 아니라 최종적인 CO_2 흡수 용량 측면에서도 더 높은 흡수 용량을 나타내고 있다. 상분리 흡수제에서 IPA는 흡수제 내에서 CO_2의 확산도와 용해도 모두를 증가시키므로 흡수제의 CO_2 흡수속도를 증가시키게 된다. 그러나 CO_2 로딩이 증가함에 따라 흡수속도는 낮아지게 되는데 이는 CO_2와 반응할 수 있는 DETA의 양이 줄어드는 것 뿐 아니라 CO_2 로딩 증가에 따라 흡수제의 점성이 증가함에 따라 흡수제 경막에서의 물질전달 저항 증가로 설명할 수 있다.

4. 결 론

DETA 수용액에 IPA를 도입함으로써 상분리에 따른 CO_2 농축과 CO_2-농축상의 부피 감소가 가능하였다. 상분리가 가능한 IPA의 첨가 조성은 20 wt% 이상이었으며 20 wt% DETA + 40 wt% IPA + 20 wt% 물로 구성된 상분리 흡수제의 경우 CO_2가 농축된 CO_2-농축상에서의 CO_2 로딩은 기존의 MEA 수용액 비해 2배에 달하는 200 g CO_2 L^{-1} solvent의 값을 보였다. 상분리에 따른 탈거탑으로 유입되는 유량감소 및 물의 함량 감소를 고려할 때 재생공정에서 필요한 공정열의 상당부분을 줄일 수 있을 것으로 판단한다. 특히 본 연구에서 상분리 촉진재로 사용한 IPA의 경우 기존의 아민 상분리 촉진제에 비해 가격이 낮아 흡수제 비용을 저감하는 데에도 기여할 수 있을 것이다. 본 연구에서 개발된 흡수제에 대한 흡수탑에서의 조업 특성, 조업에 따른 흡수제의 안정성과 재생에너지 측정은 진행 중에 있다.

감 사

이 논문은 한국에너지기술연구원 2018년도 주요사업의 지원을 받아 수행된 연구임(B5-2436).

References

1. Lu, Y., and O'Brien, K., "Challenges & Opportunity for Post-Combustion Carbon Capture," *EM Magazine*, 6-12 (2015).
2. Li, K., Leigh, W., Feron, P., Yu, H., and Tade, M., "Systematic Study of Aqueous Monoethanolamine (MEA)-based CO_2 Capture Process: Techno-Economic Assessment of the MEA Process and its Improvements," *Appl. Energy*, **165**, 648-659 (2016).
3. D'Alessandro, D. M., Smit, B., and Long, J. R., "Carbon Dioxide Capture: Prospects for New Materials," *Angew. Chem., Int. Ed.* **49**(35), 6058-6082 (2010).
4. Zhao, B., Su, Y., Tao, W., Li, L., and Peng, Y., "Post-Combustion CO_2 Capture by Aqueous Ammonia: A State-of-the-Art Review," *Int. J. Greenh. Gas Control,* **9**, 355-371 (2012).
5. Zhang, S., Shen, Y., Wang, L., Chen, J., and Lu, Y., "Phase Change Solvents for Post-Combustion CO_2 Capture: Principle, Advances, and Challenges," *Appl. Energy*, **239**, 876-897 (2019).
6. Lee, J., Hong, Y. K., and You, J. K., "Phase Separation

Characteristics in Biphasic Solvents Based on Mutually Miscible Amines for Energy Efficient CO_2 Capture," *Korean J. Chem. Eng.*, **34**(6), 1840-1845 (2017).
7. Pinto, D. D. D., Zaidy, S. A. H., Hartono, A., and Svendsen, H. F., "Evaluation of a Phase Change Solvent for CO_2 Capture: Absorption and Desorption Tests," *Int. J. Greenh. Gas Control*, **28**, 318-327 (2014).
8. Liu, F., Fang, M., Dong, W., Wang, T., Xia, Z., Wang, Q., and Luo, Z., "Carbon Dioxide Absorption in Aqueous Alkanolamine Blends for Biphasic Solvents Screening and Evaluation," *Appl. Energy*, **233-234**, 468-477 (2019).
9. Xu, Z., Wang, S., and Chen, C., "CO_2 Absorption by Biphasic Solvents: Mixtures of 1,4-Butanediamine and 2-(Diethylamino)-Ethanol," *Int. J. Greenh. Gas Control*, **16**, 107-115 (2013).
10. Wang, L., Zhang, Y., Wang, R., Li, Q., Zhang, S., Li, M., Liu, J., and Chen, B., "Advanced Monoethanolamine Absorption Using Sulfolane as a Phase Splitter for CO_2 Capture," *Environ. Sci. Technol.*, **52**(24), 14556-14563 (2018).
11. Zhuang, Q., and Clements, B., "CO_2 Capture by Biphasic Absorbent-Absorption Performance and VLE Characteristics," *Energy*, **147**, 169-176 (2018).
12. Barzagli, F., Mani, F., and Peruzzini, M., "Novel Water-Free Biphasic Absorbents for Efficient CO_2 Capture," *Int. J. Greenh. Gas Control*, **60**, 100-109 (2017).
13. Liu, F., Fang, M., Yi, N., and Wang, T., "Research on Alkanolamine-Based Physical-Chemical Solutions as Biphasic Solvents for CO_2 Capture," *Energy Fuels*, **33**(11), 11389-11398 (2019).
14. Fu, K., Chen, G., Sema, T., Zhang, X., Liang, Z., Idem, R., and Tontiwachwuthikul, P., "Experimental Study on Mass Transfer and Prediction Using Aritificial neural Network for CO_2 Absorption into Aqueous DETA," *Chem. Eng. Sci.*, **100**, 195-202 (2013).
15. Lee, H. Y., Seok, C. H., You, J. K., and Hong, Y. K., "Absorption Characteristics of Carbon Dioxide by Water-Lean Diethyltriamine Absorbents Mixed with Physical Solvents," *Clean Technol.*, **24**(1), 50-54 (2018).